

# 镁合金管材热挤压过程数值模拟研究

陈增奎<sup>1</sup>, 周卫卫<sup>2</sup>, 范新中<sup>1</sup>

(1. 中国运载火箭技术研究院 北京 100076;  
2. 北京精密机电控制设备研究所 北京 100076)

**摘要:** 为了得到综合力学性能良好的 AZ31 镁合金管材, 采用有限元软件 DEFORM-3D 对 AZ31 镁合金的挤压过程进行了模拟, 定性分析了 AZ31 坯料温度场的变化及等效应力的分布规律, 并计算了管材不同方向的最大拉应力曲线。结果表明热挤压的等效应力在模角拐弯处应力集中严重, 温度场分布接近终了时进入等温挤压阶段, 热挤压管材的横向裂纹产生的可能性较大, 分析结果为工艺实验提供了指导作用。

**关键词:** AZ31 镁合金; 挤压; 数值模拟; 温度-应力场

中图分类号: V414

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2019) 03-0054-05

## Study on Thermal Extrusion Simulation of Magnesium Alloy Tube

CHEN Zengkui<sup>1</sup>, ZHOU Weiwei<sup>2</sup>, FAN Xinzong<sup>1</sup>

(1. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China;  
2. Beijing Precision Electrochemical Control Equipment Research Institute, Beijing 100076, China)

**Abstract:** In order to obtain AZ31 alloy tubes with good mechanical properties, this paper used DEFORM-3D to simulate temperature distribution, stress distribution of the thermal extrusion process, and the maximum tensile stress of different directions. Results show that concentrative stress is at the corner of die & isothermal temperature finally as isothermal extrusion, and the transverse crack of the thermal extrusion is most likely to arise. The results is instructional for production & experimentation of AZ31 alloy tubes.

**Key words:** AZ31 magnesium alloy; Extrusion; Simulation; Temperature & stress distribution

### 0 引言

镁合金是目前可应用的最轻的金属结构材料, 是一种无污染的金属, 被誉为 21 世纪的“绿色材料”。目前, 镁合金管材、棒材、型材、带材等产品主要采用挤压方法加工成形。镁合金的挤压是镁合金塑性变形研究的一个重要方向, 具有省料、节能和节省机械加工工时、工件性能高等一系列

优点。镁合金挤压产品的组织和力学性能与模具温度、挤压速度、挤压比等密切相关。然而挤压变形过程十分复杂, 采用有限元模拟挤压过程的温度场和应力变化是有效方法之一<sup>[1-7]</sup>。

本文采用 DEFORM-3D 对镁合金的挤压过程进行了模拟, 定性分析热挤压 AZ31 坯料温度场的变化及等效应力的分布规律, 以便指导工艺实验和生产。

收稿日期: 2018-11-13; 修订日期: 2019-02-11

作者简介: 陈增奎 (1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为壳段结构与热防护结构设计。

E-mail: jackchenzk@163.com

## 1 挤压模拟的基本假设与模型参数

### 1.1 挤压模拟的基本假设

数值模拟的材料为 AZ31 镁合金, 选择黏塑性数学模型, 对黏塑性材料的基本假设包括不计材料的弹性变形, 不计体积力和惯性力, 材料是均质且各向同性, 材料满足体积不可压缩, 材料的变形流动服从 Levy-Mises 流动理论<sup>[4-9]</sup>。

本文将变形坯料与周围介质(环境)之间相互关系做出如下假设<sup>[5-8]</sup>:

- 1) 假设坯料外侧表面温度在挤压过程中始终保持不变;
- 2) 挤压过程中坯料是绝热封闭系统, 不与外界热交换;
- 3) 假设变形区挤压产生的热量向未变形区和已变形区的热传导忽略不计。

### 1.2 挤压模拟的模型与参数

由于 DEFORM-3D 不具备实体造型能力, 所以本文中镁合金挤压的三维模型的挤压模具与坯料均在 PRO-ENGINEER 软件中建立, 然后通过 DEFORM 提供的数据接口传送到软件的前处理器中, 整合成管材挤压的三维立体模型。

图 1 为 AZ31 镁合金管材挤压三维模型网格图, 采用四面体单元, 同时为减少计算分析量, 数值模拟模型简化为挤压芯、挤压筒和挤压坯料的 1/4 结构。其主要几何尺寸为: 挤压筒内径为  $\Phi 40\text{mm}$ , 高为  $60\text{mm}$ , 定径带长为  $8\text{mm}$ , 锥角为  $60^\circ$ ; 挤压芯棒长为  $45\text{mm}$ , 挤压垫为  $\Phi 41\text{mm}$ , 其尺寸略大于挤压筒内径, 目的是使挤压坯料不外流, 模拟过程能够顺利进行。

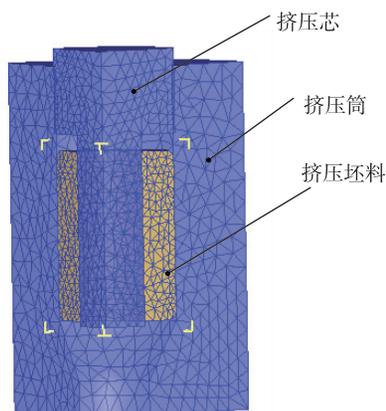


图 1 挤压数值模拟模型示意图

Fig. 1 Model of extrusion for AZ31 magnesium alloy tube

为了提高管材变形过程中计算的准确度, 从而提高模拟变形的精度和效率, 应确定镁合金在实际变形过程中的一些参数, 如摩擦系数、界面换热系数、应力与应变、应变速率和温度的关系等。根据已发表文献中的数据确定<sup>[9-10]</sup>:

1) AZ31 镁合金在塑性成形中的摩擦系数, 当有石墨油作为润滑剂时, 摩擦系数为 0.05; 当无润滑剂时, 干摩擦系数为 0.35; 确定了试样-工具间导热系数为  $10\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ 。

2) AZ31 镁合金与空气之间的对流换热系数是  $0.016\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ , 与模具之间的界面换热系数为  $11\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ 。

数值模拟使用的参数如表 1~表 3 所示, 分别表示了有限元的计算条件, AZ31 镁合金比热容和 AZ31 镁合金热传导系数。

表 1 有限元计算条件

Tab. 1 Simulation setup for AZ31 magnesium alloy tube

挤压坯料尺寸/mm	$\Phi 40 \times \varphi 22 \times 40$
挤压速度/(mm/s)	22
挤压比 $\lambda$	12.13
密度/( $\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3}$ )	$1.78 \times 10^{-6}$
环境温度/ $^\circ\text{C}$	20
试样-工具间导热系数/( $\text{N}\cdot\text{s}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ )	10
摩擦系数 $\mu$	0.3

表 2 AZ31 镁合金比热容

Tab. 2 Specific heat capacity of AZ31 magnesium alloy

温度/ $^\circ\text{C}$	20	100	200	300	400	500	600
比热容/ ( $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ )	1	1.03	1.17	1.21	1.26	1.3	1.35

表 3 AZ31 镁合金热传导系数

Tab. 3 Heat conductivity of AZ31 magnesium alloy

温度/ $^\circ\text{C}$	20	50	100	150	200	250	300	400
热传导系数/ ( $\text{N}\cdot\text{s}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ )	76.9	83.9	87.3	92.4	97	101.8	106.1	111.6

## 2 挤压模拟结果与分析

### 2.1 挤压力变化曲线

根据实验情况, 模拟选取了挤压筒与挤压芯温度  $20^\circ\text{C}$ 、挤压坯料温度  $300^\circ\text{C}$ , 图 2 为管材挤压的挤压力随挤压行程的变化曲线。

从图2可见,挤压力变化曲线呈“II”字形,挤压力在18mm~45mm行程时最大,峰值挤压力接近 $2 \times 10^5$  N。根据挤压力与行程变化曲线特点,挤压过程可大致分为3个阶段:6mm~18mm为初始挤压阶段,18mm~45mm为稳定的连续挤压阶段,45mm~58mm为终了挤压阶段。在挤压初始时,坯料在挤压垫的带动下,被压缩墩粗,坯料与挤压筒壁摩擦力小,故挤压力较小。在18mm~45mm阶段,坯料与挤压筒壁接触,随着接触面积的逐渐变大,坯料填满整个挤压筒和模孔,管材不断地从模口挤出,挤压力达到最大值。45mm~58mm为终了挤压阶段,坯料长度减少,坯料与挤压筒壁的摩擦面积减少,同时由于挤压热效应的作用,坯料和模具的温度上升,使挤压力下降。

挤压过程中加工硬化与动态再结晶软化相互作用,使挤压力出现波动。

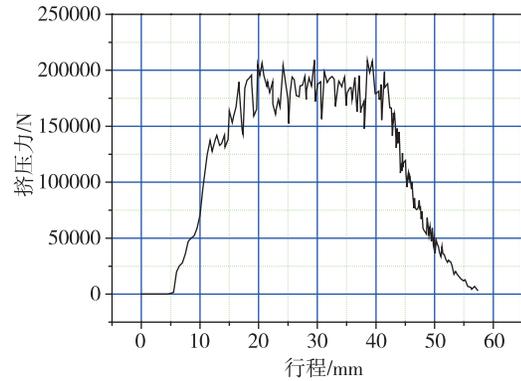


图2 挤压力-行程曲线

Fig. 2 Curve of extrusion stress-extent for AZ31 magnesium alloy tube

## 2.2 挤压过程温度场模拟

对AZ31镁合金管材的挤压过程进行模拟计算,得出不同阶段的温度场,如图3所示。

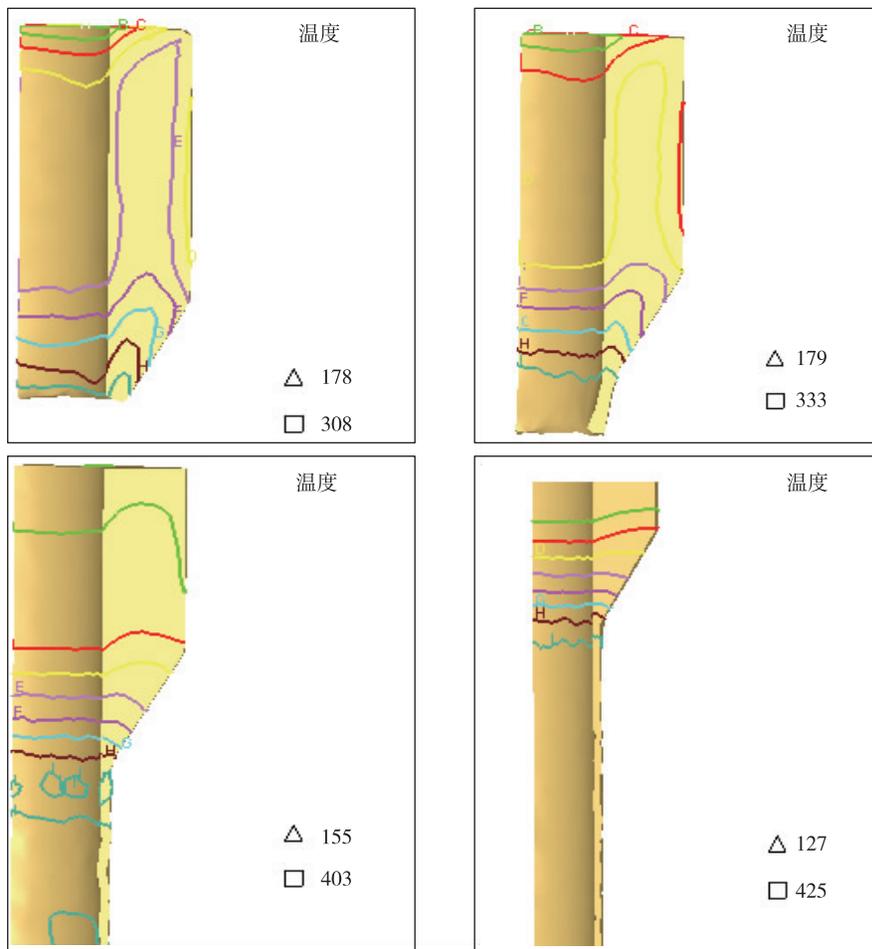


图3 挤压过程中四个不同阶段的温度场分布

Fig. 3 Temperature distribution of extrusion AZ31 magnesium alloy tube

在第 1 阶段到第 2 阶段, 坯料中心温度明显高于表面温度, 等高线呈上凸曲线, 中心温度与表面温度二者之差最大为  $35^{\circ}\text{C}$ 。这是因为坯料外表面与挤压筒接触面积大, 热传导速率大, 外表面温度降幅剧烈, 而坯料内表面与挤压芯棒接触面积较小; 所以温度的分布是中心温度大于内表面温度, 内表面温度大于外表面温度。在变形区内, 中心温度与外表面温度差在等温线 E~H 范围 ( $248^{\circ}\text{C}\sim 299^{\circ}\text{C}$ ) 内, 到模口附近温度升高到 I 线, 达到  $316^{\circ}\text{C}$ 。

第 3 阶段是稳定挤压阶段, 中心温度与内表面温度趋于相等, 仍均高于外表面温度, 但三者的温度差明显减小。

到挤压终了的第 4 阶段, 三者的温度在变形区内趋于相等, 温度从等温线 E~H 均是平直的等温线。可见挤压终了阶段, 坯料是以等温挤压的方式从变形区内至出模口挤出。热挤压前 3 个阶段在模口区域温度梯度大, 分布明显不均匀。

### 2.3 挤压过程坯料最高温度变化

为了比较挤压热效应引起温度升高对温度场影响, 计算了挤压过程最高温度的变化, 图 4 给出了计算结果。

设置的初始坯料温度为  $300^{\circ}\text{C}$ , 挤压开始后, 温度快速升高。挤压过程中坯料最高温度约为  $450^{\circ}\text{C}$ 。虽然数值模拟计算结果不十分准确, 但定性地反映出: 挤压热效应是挤压过程坯料温度场变化的主要影响因素。

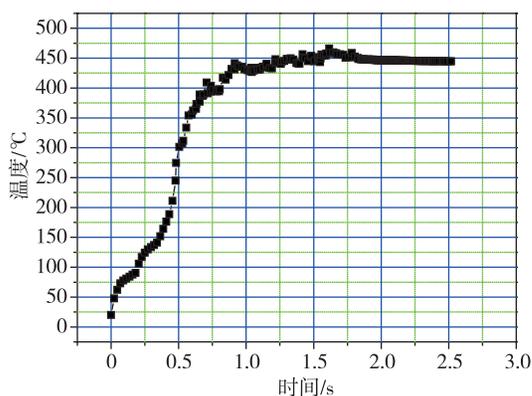


图 4 挤压过程最高温度变化

Fig. 4 Max-temperature for extrusion  
AZ31 magnesium alloy tube

### 2.4 挤压过程稳态阶段应力场模拟

图 5 为挤压变形进入稳态阶段的等效应力场。从挤压等效应力分布比较可以看出, 挤压的应力在

变形区与出模口处应力分布不均匀。挤压模口处应力与应力梯度较大, 高达  $32\text{MPa}$ 。挤压的等效应力在挤压模角的拐弯处应力集中严重, 此处容易产生挤压裂纹等缺陷, 在出变形区与模口附近应力分布极为不均匀, 从内至外, 应力逐渐减少。

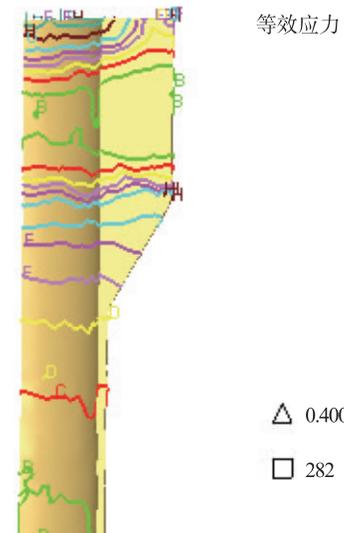
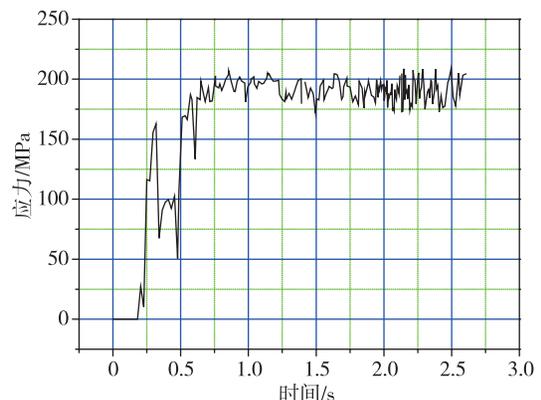


图 5 挤压过程稳态阶段的等效应力场

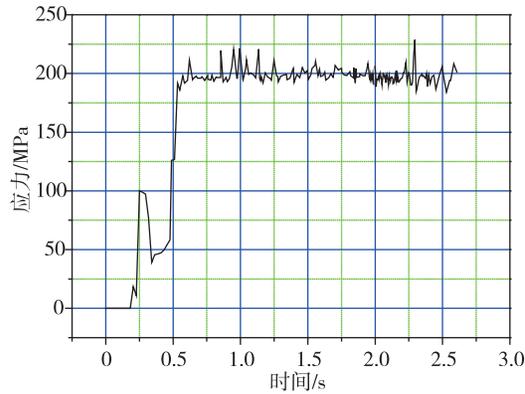
Fig. 5 Stress distribution of extrusion  
AZ31 magnesium alloy tube

### 2.5 挤压过程最大拉应力模拟计算

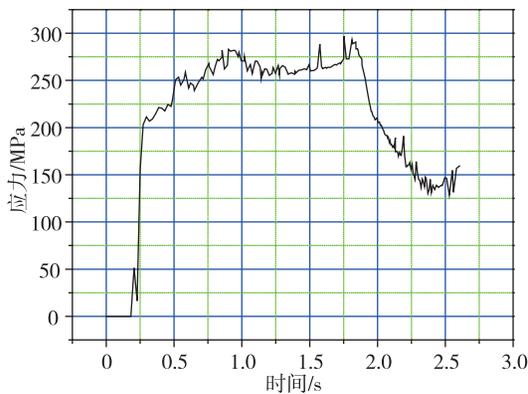
轴向拉应力过大易产生横向裂纹, 径向拉应力过大易产生纵向裂纹。图 6 分别模拟计算了热挤压的 Z 向、X 向与 Y 向的最大拉应力。由图 6 中可以看出, 热挤压的 Z 向平均约为  $280\text{MPa}$ , X 向和 Y 向约为  $210\text{MPa}$ 、 $200\text{MPa}$ 。X 向与 Y 向的最大拉应力曲线相似, 均小于 Z 向的最大拉应力分布。所以热挤压易产生纵向与横向裂纹, 横向裂纹产生的可能性更大。



(a) 挤压 X 向



(b) 挤压 Y 向



(c) 挤压 Z 向

图 6 挤压最大附加拉应力曲线

Fig. 6 Max-stress of extrusion AZ31 magnesium alloy tube

### 3 结论

1) 热挤压的前 3 个阶段温度场分布不均匀, 温度梯度大, 接近终了时进入等温挤压阶段。

2) 热挤压的等效应力在模角拐弯处应力集中严重, 在出变形区与模口附近应力分布极为不均匀, 从内至外, 应力逐渐减少。

3) 热挤压的 Z 向、X 向与 Y 向的拉应力容易引起纵向与横向裂纹, 相比而言, Z 向最大附加拉应力最大, 因此管材热挤压的横向裂纹产生的可能性更大。

### 参考文献

- [1] 陈振华. 变形镁合金 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [2] 陈增奎, 蒋清, 周卫卫, 等. AZ31 镁合金薄壁管材挤压技术研究 [J]. 精密成形工程, 2016, 8 (3): 34-39.
- [3] Takuda H, Yoshii T, Hatta N. Finite-element analysis of the formability of a magnesium-based alloy AZ31 sheet [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 89: 135-140.
- [4] 吕炎, 孔祥永. 镁合金上机匣等温精锻工艺的研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 32 (4): 127-129.
- [5] Nishida M, Yamamuro T, Nagano M, et al. Electron microscopy study of microstructure modifications in RS P/M Mg97Zn1Y2 alloy [C]. Materials Science Forum, 2003, 419: 715-720.
- [6] 张士宏, 王忠堂, 许沂, 等. 镁合金的塑性加工技术 [J]. 金属成形工艺, 2002, 20 (5): 1-4.
- [7] 余琨, 黎文献, 王日初, 等. 变形镁合金的研究、开发及应用 [J]. 中国有色金属学报, 2003, 13 (2): 277-288.
- [8] 谢建新, 刘静安. 金属挤压理论与技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001: 193-199.
- [9] 赵永忠, 朱启建, 李谋渭. 中厚板控冷过程有限元模拟及在生产中的应用 [J]. 冶金设备, 2001 (6): 12-15.
- [10] 王勛成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 1-2.

引用格式: 陈增奎, 周卫卫, 范新中. 镁合金管材热挤压过程数值模拟研究 [J]. 宇航总体技术, 2019, 3 (3): 54-58.

Citation: Chen Z K, Zhou W W, Fan X Z. Study on thermal extrusion simulation of magnesium alloy tube [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2019, 3 (3): 54-58.